

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко**

# **АТОМНА ТА КВАНТОВА ФІЗИКА-1**

## **Практикум**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 143 «Атомна енергетика»»,  
ОПП «Атомні електричні станції»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

Рецензент: *Куліч Є. В.*, канд. фіз.-мат. наук.,  
Провідний інженер Навчально-наукового центру радіаційної безпеки  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Відповідальний  
редактор *Лебедь Н. Л.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №7 від 13.05.2021 р.)  
за поданням Вченої ради ТЕФ (протокол №10 від 29.03.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Бондар Борис Михайлович*, канд. фіз.-мат. наук., асистент.  
*Лещенко Борис Юхимович*, канд. фіз.-мат. наук, доц.

## АТОМНА ТА КВАНТОВА ФІЗИКА-1 ПРАКТИКУМ

Атомна та квантова фізика-1: Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 143 «Атомна енергетика», ОПП «Атомні електричні станції» / Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,680 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 38 с.

Навчальний посібник розроблено на основі робочої програми кредитного модуля «Атомна та квантова фізика – 1» та призначено для якісної організації розв’язання студентами практичних задач при вивченні кредитного модуля, підвищення свідомості студентів у навчанні і поліпшення результатів навчання. Розв’язування задач – це ефективний шлях засвоєння інформації, отриманої на лекціях.

Авторами пропонується 80 оригінальних задач для розв’язування на практичних заняттях, а також самостійного. Задачі охоплюють основні розділи кредитного модуля «Атомна та квантова фізика- – 1».

Для кращого розуміння умов задач та успішного їх розв’язання подається коротка інформація про фізичні величини та одиниці їх вимірювання, про системи одиниць фізичних величин СІ та СГС. Рекомендуються способи вирішення задач. Додаються таблиці основних фізичних констант.

Призначений для студентів, які навчаються за освітньою– професійною програмою підготовки бакалаврів за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

© Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко, 2021  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

## ЗМІСТ

1. Передмова .....	4
2. Основні поняття .....	5
2.1 Фізичні величини .....	5
2.2 Системи одиниць фізичних величин .....	6
2.3 Міжнародна система одиниць CI (SI) .....	7
3. Розв'язування задач .....	7
4. Приклади розв'язування задач .....	9
5. Задачі для засвоєння матеріалу кредитного модуля атомна та квантова фізика-1.....	11
5.1 Будова та властивості атомів.....	11
5.2 Вплив ефекта Доплера на властивості атомних спектрів .....	12
5.3 Взаємодія важких заряджених частинок з атомами та речовиною....	14
5.4 Взаємодія легких заряджених частинок з атомами та речовиною....	17
5.5 Взаємодія гамма-квантів з атомами речовини .....	19
5.6 Випромінювання Вавилова-Черенкова .....	22
5.7 Детектори ядерного випромінювання.....	23
5.7.1 Газові іонізаційні детектори .....	24
5.7.2 Напівпровідникові детектори .....	25
5.7.3 Сцинтиляційні детектори .....	26
5.7.4 Основні характеристики детекторів випромінювання: енергетична роздільна здатність, ефективність, статистика, дозиметрія.....	28
Додаток 1. Залежність питомих іонізаційних втрат від енергії .....	32
Додаток 2. Одиниці фізичних величин .....	33
Додаток 3. Основні фізичні константи .....	35
Література .....	37

## 1. ПЕРЕДМОВА

Відомо, що успішне засвоєння лекційного матеріалу забезпечується вирішенням задач та проведенням дискусій на семінарських заняттях. Важливу роль в цьому процесі також відіграє самостійна робота студентів, в тому числі виконання домашніх завдань. Звичайно, щоб виконати цю роботу якісно, необхідно мати достатню теоретичну підготовку, отриману на лекціях.

Прослухати лекцію – це тільки перший етап підготовки висококваліфікованого фахівця, який може творчо підходити до вирішення проблем, що виникають. Отриманою на лекціях чи самостійно інформацією необхідно володіти, тобто активно використовувати її в своїй діяльності. Щоб виробити це вміння й закріпити його, необхідно розв'язувати задачі. Спочатку прості, поступово переходячи до більш складних. Серед задач, що пропонуються, є прості, але є і задачі, умови яких максимально наближені до реальних ситуацій. Наприклад, деякі з них мають надлишок даних, в інших – їх бракує. Це спонукає творчо підходити до розв'язання таких задач, думати, вибирати тільки необхідні дані з умови задачі, або знаходити їх у довідниках. Розв'язування таких задач навчає самостійно користуватися підручниками, довідниками та іншими джерелами інформації.

Шляхів до розв'язку може бути декілька. Бажано проаналізувати кожен із них, і вибрати оптимальний. Деякі задачі якісні. Для їх розв'язання необхідне введення додаткових умов, фізичних величин, обмежень. По суті — це вже самостійне наукове дослідження, тобто вивчення залежності однієї фізичної величини від зміни інших.

Успіху можна досягти тільки на шляху пізнання: **знати-уміти-творити**. Не зупиняйтеся на першому етапі пізнання. Пройти повністю цей шлях допоможуть вам задачі.

Щоби виконати цю роботу якісно, необхідно мати достатню теоретичну підготовку. Перед тим, як приступити до розв'язування задач, треба

обов'язково ознайомитися з такими поняттями як **фізична величина**, **значення фізичної величини** та **одиниця її вимірювання**, **системи одиниць**.

Даний посібник має на меті навчити студентів творчо підходити до розв'язку задач та закріпити теоретичні знання, отримані на лекціях. Запропоновані в Посібнику задачі є оригінальними та охоплюють основні розділи першого кредитного модуля дисципліни «Атомна та квантова фізика [1]. Умови задач відповідають тій області знань, в якій студент має компетентності [2].

## 2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

### 2.1 Фізичні величини

**Фізичними величинами** називають кількісні характеристики явищ природи (довжина, час, маса, швидкість і т. п.). Для кількісного вимірювання будь-якої фізичної величини вводиться **одиниця вимірювання** цієї фізичної величини.

**Значення фізичної величини** – це число одиниць вимірювання, прийнятих для даної фізичної величини. Наприклад:

Фізична величина – довжина.

Одиниця її вимірювання – метр.

Значення цієї фізичної величини – 2,3 метра.

Тут 2,3 – це число одиниць вимірювання довжини.

У природі фізичні величини пов'язані між собою кількісно певними рівняннями – законами природи (закон Ньютона, закон Кулона, закон радіоактивного розпаду і т.д.), а тому одиниці вимірювань теж пов'язані між собою відповідними рівняннями. При знаходженні розв'язку якогось рівняння не можна значення фізичних величин, що входять до нього, підставляти в будь-яких одиницях, довільно. Наприклад, довжину підставляти в сажнях, вузлах, милях, дюймах, метрах, сантиметрах, мікронах і т.п.

При розв'язуванні рівнянь необхідно користуватися певною сукупністю основних і похідних одиниць, що відносяться до деякої системи, яку називають системою одиниць фізичних величин.

## 2.2 Системи одиниць фізичних величин

Існувало багато одиниць вимірювання фізичних величин. Після введення міжнародних еталонів вимірювання довжини, ваги та часу в 1881 році на Першому міжнародному конгресі в Парижі було прийнято систему одиниць СГС (сантиметр, грам, секунда). У цій системі основними фізичними величинами було вибрано довжину, масу і час. Інші одиниці фізичних величин є похідними від основних. Наприклад, швидкість  $v=s/t$  має розмірність  $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ , і ця одиниця вимірювання швидкості є похідною від довжини та часу.

Розмірність фізичної величини – це вираз, що показує зв'язок цієї фізичної величини з основними фізичними величинами системи. Буває, що різні фізичні величини мають однакову розмірність, але їх відрізняють за фізичним змістом. Так, наприклад, однакову розмірність Дж/кг мають одиниці вимірювання дози Грей і Зіверт.

При розширенні системи СГС на електродинамічні явища було введено системи СГСЕ (враховано електростатичні явища) та СГСМ (враховано електромагнітні явища), які будуються на основі закону Кулона.

Нижче наведені основні фізичні величини та їх розмірності (в квадратних дужках), які використовуються при розв'язанні запропонованих в практикуму задачах:

- енергія  $E$  [Дж, еВ, ерг];
- питомі іонізаційні втрати енергії  $dE/dx$  [ерг/см,  $\text{MeV}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{см}^2$ , еВ, ерг];
- пробіг частинки  $R$  [ $\text{г}/\text{см}^2$ , см];
- лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu$  [ $1/\text{см}$ ];
- масовий коефіцієнт ослаблення  $\tau$  [ $\text{см}^2/\text{г}$ ];
- радіаційна довжина  $x_0$  [ $\text{г}/\text{см}^2$ ];

- переріз взаємодії  $\sigma$  [барн,  $\text{см}^2$ ];
- заряд  $Q$  [Кл];
- ємність  $C$  [Ф]
- енергія утворення пари  $W$  [eV];
- питомий опір  $\rho$  [Ом·см];
- ширина збідненої облатці p-n переходу  $d$  [см];
- ефективність реєстрації  $\varepsilon$  [%].

### **2.3. Міжнародна система одиниць СІ (SI)**

Міжнародна система одиниць СІ (SI) [3] була прийнята у 1960 році, й з часом доповнюється і вдосконалюється. Складається система з 7 основних одиниць, 2 додаткових та похідних одиниць, утворених від основних та додаткових. Основними одиницями є метр, кілограм, секунда, Ампер, Кельвін, моль, кандела. Додатковими одиницями є радіан, стерadian. Похідні одиниці СІ групуються за розділами фізики (механіка, теплота, електрика і магнетизм, іонізуюче випромінювання, атомна та ядерна фізика і т.д.) [4]. Багато похідних одиниць носять прізвища вчених (Ньютон, Герц, Паскаль, Джоуль, Ват, Кулон, Ом, Вольт і т.д.), а тому пишуться з великої букви.

Стандарт не обмежує застосування деяких позасистемних одиниць у наукових дослідженнях і публікаціях теоретичного характеру в області природничих наук. Так, серед позасистемних одиниць є одиниця енергії електронвольт (eV), що дозволяється до використання без обмеження в часі.

## **2. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ**

Ще раз підкреслимо, що розв'язування задач – це ефективний шлях засвоєння інформації, отриманої на лекціях, перетворення цієї інформації в знання, якими активно користуються в практичній діяльності, набувають компетентності, з часом стають спеціалістами, професіоналами.

Перш за все, необхідне розуміння явищ природи, закономірностей, що пов'язують фізичні величини, тобто вміти пояснювати своїми словами явища природи, формулювати закони природи та математично записувати їх, знати, де і як їх можна застосовувати. Наприклад, формули для кінетичної енергії — різні для нерелятивістської та релятивістської частинок, також різні формули для енерговиділення при бета-мінус та бета-плюс [5] розпадах і т.п.

При розв'язуванні задач потрібно дотримуватися певної методики:

1) уважно прочитати умову задачі, зрозуміти суть фізичних явищ та процесів, про які йдеться. Бажано показати їх на рисунку у схематичному вигляді (схема розпаду ядра, взаємне розташування об'єктів і т.п.). У багатьох випадках рисунок допомагає знайти вірний шлях розв'язування. Як правило, в задачі описуються умови, за яких відбувається якийсь процес, даються значення фізичних величин. Часто суть розв'язку задачі полягає в тому, щоб використовуючи відомі значення фізичних величин (із наведених в умові задачі – взяти тільки необхідні), а також підібравши потрібні дані (яких бракує в умові задачі) з таблиць, знайти невідоме значення;

2) записати деякі умови задачі в математичній формі згідно з відомими співвідношеннями та законами;

3) проаналізувати можливі шляхи пошуку невідомої величини та вибрати оптимальний варіант розв'язку;

4) провести обчислення.

Найбільше помилок трапляється при розв'язанні рівнянь, написаних у буквену вигляді. Щоб успішно пройти цей технічний етап обчислень, необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

а) вибрати систему одиниць, у якій будуть проводитись обчислення (СІ, СГС). Якщо користуєтеся готовою формулою із підручників чи довідників, уточніть, у якій системі одиниць вона написана. Дотепер багато формул та значень фізичних величин, констант подано в системах СГС, СГСЕ, СГСМ. А тому особливу увагу потрібно звертати на одиниці вимірювань, які стоять



поряд із значенням фізичної величини, тобто в яких одиницях представлена фізична величина.

б) після написання формули в буквеному вигляді справа пишемо знак дорівнює (“=”) і, не змінюючи послідовності розташування величин, підставляємо їх числові значення у вибраній системі одиниць із позначенням розмірності величин. Цей вираз є оригіналом, у якому нічого не можна змінювати (спрощувати, скорочувати, округлювати і т.п.)! За необхідності – знову пишемо знак рівності, переписуємо оригінал, тобто, отримуємо копію оригіналу, в якому вже можемо робити різні скорочення, спрощення, проміжні обчислення і т.д., поки не отримаємо кінцевий результат. Останній повинен мати числове значення і поряд – обов’язково! – його розмірність. При переведенні будь-якого значення фізичної величини з однієї розмірності в іншу (наприклад, сантиметри в мікрони, Джоулі в Мегаелектронвольти, або навпаки) необхідно обов’язково писати, яка величина на яку величину (коефіцієнт) ділиться чи множиться.

Якщо відповідь виявилася неправильною, то при такій формі запису обчислень буде легко знайти місце помилки. Розмірності біля величин теж можуть підказати: наприклад, що їх табличне значення не було переведено в потрібну систему одиниць; також вони визначають розмірність кінцевого результату.

Оформлення розв’язку задач має бути у відповідності до вимог, викладених у методичних вказівках до практичних занять для студентів спеціальності «Атомна енергетика» [6].

### **3. ПРИКЛАДИ РОЗВ’ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ**

**Задача А.** З якою швидкістю рухається протон, що має енергію 1 МеВ?

*Розв’язок.* Кінетична енергія протона значно менша за його внутрішню енергію  $E=mc^2=938,3$  МеВ, а тому він є нерелятивістською частинкою і зв’язок енергії зі швидкістю виражається такою формулою

$$E = \frac{mv^2}{2},$$

з якої знаходимо швидкість

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}}.$$

Обчислення в системі СІ: в формулі всі фізичні величини повинні бути представлені в системі СІ. Врахуємо, що

1 eB=1,6·10<sup>-12</sup> ерг=1,6·10<sup>-19</sup> Дж, тоді:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ eB} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{eB}}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}} = 1,38 \cdot 10^7 \text{ м / с}.$$

Обчислення в системі СГС:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ eB} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{ерг}}{\text{eB}}}{1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}}} = 1,38 \cdot 10^9 \text{ см / с}.$$

**Задача Б.** Яку енергію (в електронвольтах) та швидкість має тепловий нейтрон?

*Розв'язок.* Тепловими називають нейтрони, що є в тепловій рівновазі з атомами речовини, в якій знаходяться нейтрони. Енергія і відповідні швидкості теплових нейтронів залежать від температури Т середовища. Їх розподіл за швидкостями збігається з максвелівським розподілом атомів середовища. Максимальне число нейтронів (найбільш ймовірне) має енергію

$$E = \frac{mv^2}{2} = kT,$$

де  $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$  – найбільш ймовірна швидкість нейтронів,  $m$  – маса нейтрона,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура. Прийmemo  $T=293 \text{ К}$  ( $t = 20^\circ \text{ С}$ ).

Обчислення в системі СІ: енергія теплового нейтрона

$$E = kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 293 \text{ К} = 4,05 \cdot 10^{-21} \text{ Дж},$$

або в електронвольтах

$$E = \frac{4,05 \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{eB}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{eB}}} = 0,025 \text{ eB}.$$

Тоді найбільш ймовірна швидкість

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,05 \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{eB}}}{1,67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}}{\text{eB}}}} = 2200 \text{ м / с}.$$

## 5. ЗАДАЧІ ДЛЯ ЗАСВОЄННЯ МАТЕРІАЛУ КРЕДИТНОГО МОДУЛЯ АТОМНА ТА КВАНТОВА ФІЗИКА-1

### 5.1. Будова та властивості атомів

Атоми мають **дискретні енергетичні стани**  $E_n$ , серед них основний ( $n=0$ ), з мінімумом внутрішньої енергії атома, та збуджені стани ( $n=1,2,3\dots$ ), в які атом переходить при поглинанні енергії. Час життя атома  $\tau$  в збудженому стані  $E_n$  малий ( $10^{-10} - 10^{-7} \text{ с}$ ), тому атом швидко переходить (повертається) в основний стан  $E_0$  прямо, або каскадом через проміжні стани. При цьому атом випромінює поглинуту енергію порціями (фотонами), енергія яких визначається різницею енергій між енергетичними станами, тобто різницею між початковим енергетичним станом  $E_i$  та кінцевим (проміжним)  $E_f$ :

$$E = h\nu = E_i - E_f.$$

Відлік енергій збуджених станів (енергетична шкала) починається з основного стану, тобто  $E_0=0$ . Короткий час життя  $\tau$  збудженого стану веде до невизначеності (неточності знання) енергії  $E_n$  збудженого стану. Зв'язок між цими величинами подається **невизначеністю Гейзенберга** [7]

$$\Gamma\tau \geq \hbar.$$

Тобто, якщо час життя збудженого стану  $\tau$ , то його енергія може мати значення в межах  $E_n \pm \frac{1}{2}\Gamma$ , де  $\Gamma$  – повна ширина енергетичного піка (спектральної лінії) на половині висоти, або природна ширина лінії.

### **Задачі.**

1. Енергія зв'язку електрона в атомі водню (енергія іонізації) дорівнює 13,56 еВ. Оцінити розмір атома водню.
2. Із аналізу результатів дослідів Резерфорда по розсіянню  $\alpha$ -частинок золотом (1911 р) оцінити розмір ядра золота.
3. Оцінити швидкість електрона в атомі водню.
4. Підрахувати потенціальну та кінетичну енергію електрона в атомі водню, знайти співвідношення між ними, а також порівняти з енергією зв'язку.
5. Визначити енергетичну ширину збудженого стану атома, якщо час його життя складає  $10^{-8}$  секунди.
6. Довжини хвиль видимого світла лежать в межах від 400 нм (фіолетове) до 800 нм (червоне). Визначити енергії, які відповідають цим довжинам хвиль (в еВ).

### **5.2. Вплив ефекта Доплера на властивості атомних спектрів**

**Ефект Доплера** – зміна частоти коливань  $\nu$ , що реєструються приймачем (детектором) при відносному русі джерела коливань та приймача [8]:

$$\nu = (1 \pm v / u) \nu_0,$$

де  $\nu_0$  – частота генератора (джерела) коливань;  $v$  – швидкість відносного зближення ( $+v$ ) або віддалення ( $-v$ );  $u$  – швидкість поширення коливань в середовищі:

$u = c = 3 \times 10^8$  м/с для електромагнітних хвиль в вакуумі, а для звукових коливань;

$u = 350$  м/с в повітрі;

$u = 1500$  м/с в воді;

$u = 5000$  м/с в сталі.

**Допплерівське розширення спектральних ліній** відбувається при русі атомів, що випромінюють:

$$\Delta \nu = (\nu / c) \nu_0.$$

Якщо розподіл швидкостей максвелівський, то розподіл інтенсивності в спектральній лінії дає доплерівську ширину лінії  $D$ , яка значно перевищує природну ширину лінії  $\Gamma$ :

$$D = h \Delta \nu_D = \frac{\nu_D}{c} h \nu_0, \quad \nu_D = \sqrt{2 \langle \nu_x^2 \rangle}.$$

Нагадаємо, що

$$\langle \nu_x^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle \nu^2 \rangle = \frac{kT}{m},$$

найбільш імовірна швидкість

$$\nu_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}},$$

середня арифметична швидкість

$$\nu = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

і середньоквадратична швидкість

$$\sqrt{\langle \nu^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

Приведені значення швидкостей отримані із функції розподілу молекул газу за швидкостями (Максвел, 1860 рік):

$$F(\nu) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m\nu^2}{2kT}} \cdot 4\pi \nu^2 = A(T) \cdot \nu^2 \cdot e^{-\frac{m\nu^2}{2kT}}.$$

Добуток  $F(\nu) d\nu$  дає ймовірність того, що молекула має швидкість в межах від  $\nu$  до  $\nu + d\nu$  незалежно від напрямку руху.

Розподіл Гауса для випадкової величини:

$$\varphi(\nu_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot e^{-\frac{m\nu_x^2}{2kT}}.$$

Середня енергія молекул:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad i = n_{\text{пост}} + n_{\text{оберт}} + 2n_{\text{коливн}} \quad (n - \text{кількість ступенів вільності}).$$

### Задачі.

7. Джерело звуку (440 Гц, нота ля першої октави) рухається повз спостерігача зі швидкістю 120 км/год. Які ноти буде чути спостерігач при наближенні та віддаленні джерела звуку.
8. Оцінити відносну величину Доплерівського розширення лінії з довжиною хвилі 4500 Å. Середню швидкість руху атомів прийняти рівною  $10^3$  м/с.
9. Оцінити відносне Доплерівське розширення спектральної лінії водню в газовому розряді. Вважати температуру плазми кімнатною.
10. З якою швидкістю віддаляється зірка нашої Галактики від спостерігача, якщо відносне зміщення спектральної лінії дорівнює 0,2.
11. Проїхавши перехрестя на червоне світло зі швидкістю 150 км/год водій автомашини стверджував поліцейському, що він бачив зелене світло ( $\lambda=530$  нм) світлофора замість червоного ( $\lambda=630$  нм). Чи правду він сказав? При якій швидкості його твердження буде вірним?

### 5.3. Взаємодія важких заряджених частинок з атомами та речовиною

Питомі іонізаційні втрати енергії  $dE/dx$  в речовині важкої зарядженої частинки, що має енергію  $E$  і заряд  $eZ_{\text{ч}}$  [9]:

$$-\frac{dE}{dx} \left[ \frac{\text{епг}}{\text{см}} \right] = \frac{4\pi z_{\text{ч}}^2 e^4 n_{\text{е}}}{v_{\text{ч}}^2 m_{\text{е}}} \left[ \ln \frac{2m_{\text{е}} v_{\text{ч}}^2}{\bar{I}} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right],$$

де  $n_{\text{е}}$  – концентрація електронів у речовині;  $m_{\text{е}}$  – маса електрона;  $e$  – елементарний заряд;  $v_{\text{ч}}$  – швидкість частинки;  $\bar{I} = 13,5 \cdot z_{\text{р}}$  – середній потенціал іонізації речовини, атоми якої мають заряд  $z_{\text{р}}$ ;  $\beta = v_{\text{ч}}/c$  – релятивістський коефіцієнт.

Якщо знехтувати релятивістськими поправками і врахувати, що енергія частинки  $E_q = \frac{M_q v_q^2}{2}$ , то отримаємо залежність питомих іонізаційних втрат від маси частинки  $M_q$  та її енергії  $E_q$ :

$$-\frac{dE}{dx} \left[ \frac{\text{e} \cdot \text{p} \cdot \text{g}}{\text{cm}} \right] = \frac{2\pi z_q^2 e^4 n_e M_q}{E_q m_e} \ln \frac{4m_e E_q}{M_q \bar{I}}.$$

На рис.1 (див. додаток 1) показано залежність питомих іонізаційних втрат від кінетичної енергії  $\alpha$ -частинок, дейтронів, протонів, мюонів та електронів в повітрі за нормальних умов. Пунктир – з врахуванням питомих втрат на гальмівне випромінювання.

$$\text{Пробіг частинки } R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)} \sim \frac{E_q^2}{z_q^2 M_q}, \quad - \text{ пропорційність виконується в}$$

межах дії формули для  $dE/dx$ .

### Задачі.

12. Обчислити питомі іонізаційні втрати протонів з енергією 1 MeV в азоті. Отриманий результат порівняти з даними довідника. Обчислення провести в системах СГС та СІ.
13. Протони та альфа-частинки з однаковою початковою енергією 6.5 MeV гальмуються в алюмінії. У скільки разів відрізняються питомі іонізаційні втрати на початку гальмування?
14. У скільки разів відрізняються іонізаційні втрати для альфа-частинок з енергією 5 MeV та протонів з енергією 2 MeV?
15. На який максимальний кут може відхилитися протон з енергією 100 keV при розсіянні на електроні атома? Обчислити також максимальну енергію електронів при такому розсіянні (використати імпульсну діаграму розсіяння).
16. Альфа-частинки з енергією 5 MeV після розсіяння на протонах реєструються під кутом  $8^\circ$ . Під яким кутом вилітають протони?

Визначити їх енергію та енергію альфа-частинок після їх розсіювання. Порівняти результати, отримані при використанні аналітичних виразів, а також отримані графічно з імпульсної діаграми пружного розсіювання, побудованої в зручному масштабі.

17. Оцінити максимальну енергію, втрачену альфа-частинкою з енергією 5 MeV при одному акті йонізації в чутливому об'ємі детектора. Використати імпульсну діаграму розсіювання.
18. Електрон після пружного розсіювання на протоні вилетів під кутом  $90^\circ$ . Користуючись імпульсною діаграмою пружного розсіювання показати кут і напрямок вильоту протона.
19. Нейтрон після пружного розсіювання на протоні вилетів під кутом  $45^\circ$ . Користуючись імпульсною діаграмою пружного розсіювання показати кут і напрямок вильоту протона.
20. Альфа-частинки з енергією 5.1 MeV реєструються поверхнево-бар'єрним детектором. Шар золота на входному вікні детектора складає 0.1 мкм. Оцінити енергетичні втрати альфа-частинки в золоті. Використати значення для енергетичних втрат альфа-частинки в золоті  $dE/dx = 223 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ .
21. Скільки енергії втратить протон з початковою кінетичною енергією 2 GeV, пройшовши 20 мм в алюмінії.
22. Яка частинка більше пролетить у повітрі – протон з енергією 2 MeV чи альфа-частинка з енергією 5 MeV? У скільки разів?
23. Альфа-частинки, що вилітають із Pu-239, реєструються твердотільним детектором на основі нітрату целюлози. Оцінити глибину проникнення альфа-частинок в детектор.



#### 5.4. Взаємодія легких заряджених частинок з атомами та речовиною

Для релятивістських частинок зв'язок між енергією, імпульсом, швидкістю та масою частинки:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2, \quad p = \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

При розсіянні частинки, що має масу  $M_1$  та енергію  $E_1$  на нерухомій частинці ( $E_2=0$ ), що має масу  $M_2$ , передається:

- максимальна енергія  $E_{\max} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E_1$  (формулу легко отримати з діаграми пружного розсіяння);
- середня енергія  $\langle E \rangle = \frac{1}{2} E_{\max} = \frac{2M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E_1$ .

Питомі **іонізаційні** втрати легких частинок можуть бути обчислені за формулою [7]:

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\text{іон}} = \frac{2\pi e^4 n_e}{m_e v^2} \left[ \ln \frac{m_e v^2 E_e}{2I^2 (1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8} (1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right].$$

Питомі втрати легких частинок на **випромінювання**:

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\text{випр}} = n_A E_e \frac{z_y^2 e^4}{137(m_e c^2)^2} \left[ 4 \ln \frac{2E_e}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right],$$

де  $n_A$  – концентрація атомів речовини. Відношення енергетичних втрат:

$$\frac{\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\text{випр}}}{\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\text{іон}}} \approx \frac{E_e [\text{MeV}] - z_y}{800} = 1, \quad \text{за умови } E_e = E_{\text{критична}}.$$

Для пучка моноенергетичних електронів з енергією  $E_e$  та пучка електронів  $\beta$  – спектру, що втрачають енергію переважно за рахунок іонізаційних втрат, екстраюльований пробіг  $R$  в речовині оцінюють за формулами:

$$R\left[\frac{z}{\text{см}^2}\right] = 0,526E_e[\text{MeV}] - 0,094,$$

$$R\left[\frac{z}{\text{см}^2}\right] = 0,542E_\beta[\text{MeV}] - 0,133.$$

Для релятивістських електронів втрати енергії на випромінювання пропорційні енергії електронів  $E_e$  і переважають втрати на іонізацію ( $E_e > E_{\text{крит}}$ ):

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{випр}} = -\frac{1}{x_0} E_e,$$

де  $\frac{1}{x_0}$  – коефіцієнт пропорційності, в який ввійшли всі константи формули,

наведеної вище.

При проходженні тонкого (вузького, колімованого) пучка електронів відстані  $x$  в речовині, його середнє значення енергії зменшується від початкової  $E_e$  до  $\bar{E}(x)$ :

$$\bar{E}(x) = E_0 \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right), \quad (\bar{E} \equiv \langle E \rangle).$$

Тут  $x_0$  – радіаційна довжина – відстань, на якій середнє значення енергії пучка за рахунок радіаційних втрат зменшується в  $e$  раз. Радіаційна довжина дорівнює приблизно  $36 \text{ г/см}^2$  для повітря та води,  $24 \text{ г/см}^2$  для алюмінію, та  $6 \text{ г/см}^2$  для свинцю.

### Задачі.

24. Знайти екстрапольований пробіг для електронів з енергією  $1.33 \text{ MeV}$  в алюмінії (в мм та в  $\text{г/см}^2$ ).
25. Знайти екстрапольований пробіг електронів з енергією  $2,2 \text{ MeV}$  у залізі (в мм та в  $\text{г/см}^2$ ).
26. Кінетичні енергії електрона та протона дорівнюють  $10 \text{ MeV}$ . Обчислити їх швидкості.
27. Для збільшення яскравості екран кінескопу з внутрішньої сторони покривають тонким шаром алюмінію. Оцінити діапазон оптимальної

товщини покриття.

28. Оцінити при яких енергіях електронів іонізаційні втрати в 2 рази перевищують втрати на гальмівне випромінювання в міді та в алюмінії. Визначити критичні енергії.
29. Обчислити питомі втрати електронів на випромінювання, що рухаються в свинці з енергією 10 MeV. Порівняти їх з іонізаційними питомими втратами.
30. Оцінити середню енергію пучка електронів, що має початкову енергію 10 MeV після проходження свинцевої пластини товщиною 40 см. Радіаційна довжина для свинцю  $5,8 \text{ г/см}^2$ .
31. Детектор  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  має діаметр 150 мм та висоту 100 мм. Скільки енергії залишив в детекторі пучок електронів з початковою енергією 10 MeV? Радіаційна довжина детектора (кристала  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) 1,13 см.

### 5.5. Взаємодія гамма-квантів з атомами речовини

Закон ослаблення (зменшення) інтенсивності пучка гамма-квантів при проходженні товщини  $x$  поглинача [10]

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x),$$

тут  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення,  $I$  – інтенсивність пучка після поглинача,  $I_0$  – інтенсивність пучка до поглинача. Часто використовують масовий коефіцієнт ослаблення  $\tau = \mu/\rho$ . Лінійний коефіцієнт  $\mu$  визначається добутком мікроскопічного коефіцієнту  $\sigma$ , який показує ймовірність (поперечний переріз) взаємодії гамма-квантів з окремими атомами речовин, на концентрацію атомів речовини  $n$ :

$$\mu = n\sigma.$$

В свою чергу, взаємодія може відбуватися такими трьома механізмами:

1. Фотоелектричне поглинання атомом,  $\sigma_{\text{ф}}$  (фотоефект);
2. Розсіяння на електронах, в тому числі і на вільних  $\sigma_{\text{к}}$  (комптонівське розсіяння, комптон-ефект);

### 3. Народження електрон-позитронних пар, $\sigma_n$ при гальмуванні гамма-кванта в полі ядра або електрона).

Тому лінійний коефіцієнт може бути записаний як сума:

$$\mu = n\sigma = n\sigma_\phi + n\sigma_\kappa + n\sigma_n.$$

Розмірність поперечних перерізів є *барн/атом*, 1 барн =  $1 \cdot 10^{-24}$  см<sup>2</sup>. Величина поперечного перерізу, тобто ймовірність процесу (механізму взаємодії) залежить від заряду атома (зарядового числа  $Z$ ) та від енергії гамма-кванта  $E_\gamma$ . Так, переріз фотоефекту пропорційний (але не дорівнює!) заряду в 5-й степені і обернено пропорційний енергії гамма-кванта

$$\sigma_\phi \sim \frac{z^5}{E_\gamma},$$

для комптонівського розсіювання

$$\sigma_\kappa \sim \frac{z}{E_\gamma},$$

і у випадку утворення пар (для енергій вище порогу  $E_\gamma > 2m_e c^2$ ):

$$\sigma_n \sim z^2 \ln 2E_\gamma.$$

При збільшенні енергії переріз плавно виходить на насичення і максимальне значення перерізу ( $E_\gamma > 50m_e c^2$ )

$$\sigma_{n\max}(cm^2) = \frac{z^2}{137} r_e^2 \frac{28}{9} \ln \frac{183}{\sqrt[3]{Z}} \approx 1,9 \cdot 10^{-27} z^2 \ln \frac{183}{\sqrt[3]{Z}}.$$

В результаті взаємодії гамма-квантів з атомами з'являються електрони, кінетична енергія яких  $E_e$  визначається механізмом взаємодії. Для фотоефекту:

$$E_e = E_\phi = E_\gamma - E_i,$$

де  $E_i$  – енергія зв'язку  $i$ -електрона з атомом. Для комптонівського розсіювання (комптон-ефект):

$$E_e = E_\kappa = 0 \div E_{\max}, \quad E_{\max} = \frac{2 \frac{E_\gamma}{m_e c^2}}{1 + 2 \frac{E_\gamma}{m_e c^2}} E_\gamma,$$

$E_{\text{max}}$  завжди менше енергії фотоелектронів  $E_{\text{ф}}$ , і у випадку утворення пар енергія електронів:

$$E_e = E_n \approx \frac{E_\gamma - 2m_e c^2}{2}.$$

Розподіл електронів за енергіями визначає функцію відгуку гамма-електрометра, яка залежна не тільки від енергії гамма-квантів (електронів), але і від розмірів, форми та матеріалу чутливого об'єму детектора.

### **Задачі.**

32. Енергія гама-квантів дорівнює 1.17 MeV. У скільки разів переріз фотоефекту на атомах алюмінію відрізняється від перерізу фотоефекту на атомах вольфраму?
33. Чи буде спостерігатися фотоефект при взаємодії фотонів видимого світла з металами (алюміній, мідь, вольфрам)?
34. Енергія гама-квантів дорівнює 1.33 MeV. Знайти максимальну енергію електронів при комптонівському розсіянні гама-квантів в органічному сцинтиляторі.
35. Визначити границю, до якої прямує різниця між енергією фотоелектронів (електронів, що утворилися під час фотоефекту) і максимальною енергією електронів від комптонівського розсіяння при великих енергіях гамма-квантів.
36. В довіднику приводиться поперечний переріз взаємодії гама-квантів з речовиною, розрахований на один атом. Знайти коефіцієнт, що зв'яже цей поперечний переріз з масовим коефіцієнтом ослаблення, та обчислити останній для свинцю.
37. Вибрати детектор і оцінити його оптимальні розміри для калориметра гама-квантів в CMS, що встановлений на колайдері в CERN.

## 5.6. Випромінювання Вавилова-Черенкова

Випромінювання Вавилова-Черенкова з'являється в оптично прозорій речовині з коефіцієнтом заломлення світла  $n$  коли швидкість зарядженої частинки  $v$  перевищує швидкість світла в цій речовині  $c/n$ . Світло розповсюджується під кутом  $\theta$  до напрямку руху частинки. При цьому виконується співвідношення [11]:

$$\cos\theta = \frac{c/n}{v} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta}.$$

Інтенсивність випромінювання з частотою  $\nu$  можна підрахувати за формулою:

$$N(\nu)d\nu = \frac{2\pi(ze)^2}{\hbar c^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) d\nu.$$

Оскільки інтенсивність рівномірно розподіляється за частотами, то в оптичному діапазоні випромінювання має яскравий синьо-голубий колір і значно перевищує гальмівне випромінювання.

### Задачі.

38. Різнорахувати кут, під яким спостерігається випромінювання Вавилова-Черенкова при русі протона з енергією 10 ГеВ в пластмасі ( $n=1,4$ ).
39. Визначити діапазон енергій протонів, які можна реєструвати детектором Черенкова. Радіатор - дистильована вода.
40. Визначити діапазон енергій електронів, які можна реєструвати детектором Черенкова. Радіатор - плексиглас.
41. Обчислити кількість фотонів (інтенсивність), що випромінюються в оптичному діапазоні радіатором із пластмаси товщиною 1 см в детекторі Вавилова-Черенкова.
42. Чи можна використати гальмівне випромінювання для реєстрації  $^{90}\text{Sr}$ ?
43. Чи можна використати детектор Вавилова-Черенкова для реєстрації  $^{90}\text{Sr}$ ?
44. Яку долю становлять втрати на гальмівне випромінювання по відношенню до втрат на іонізацію при реєстрації  $^{90}\text{Sr}$  пластмасовим сцинтилятором?

### 5.7. Детектори ядерного випромінювання

В чутливому об'ємі детектора (іонізаційна камера, напівпровідниковий детектор) при попаданні в нього зарядженої частинки утворюється [11]

$$n = \frac{kE}{\bar{W}}$$

пар електрон-іон, або сумарний заряд одного знаку

$$Q = ne,$$

де  $E$  – кінетична енергія частинки,  $k$  – частина енергії, залишена в чутливому об'ємі, ( $k=1$  якщо пробіг частинки повністю вкладається в чутливому об'ємі детектора),  $\bar{W}$  - середнє значення енергії, що витрачається на утворення однієї пари:

- $\bar{W} \approx 30\text{eV}$  для газових детекторів;
- $\bar{W} \approx 3\text{eV}$  для напівпровідникових детекторів.

Амплітуда сигналу на виході детектора:

$$V = \frac{Q}{C},$$

де  $C$  – електроємність детектора, яка зазвичай не перевищує декількох десятків пікофарад.

Процес реєстрації частинки детектором займає певний час, протягом якого детектор стає нечутливим до чергової частинки, що попадає в нього. Цей час називається **мертвим часом**. Мертвий час призводить до прорахунків, які необхідно враховувати введенням відповідних поправок. Так, інтенсивність імпульсів з детектора  $N$  буде визначатися потоком падаючих на детектор частинок  $N_0$  і мертвим часом  $\tau$ :

$$N = \frac{N_0}{N_0\tau + 1}.$$

### 5.7.1 Газові іонізаційні детектори

В якості чутливого об'єму в газових іонізаційних детекторах використовується газ, який під дією випромінювання іонізується. Прикладаючи напругу, під дією електричного поля утворені електрони та іони збираються до електродів, створюючи на виході детектора струм.

Гамма-кванти реєструються газовими детекторами шляхом вибивання зі стінки, що оточує чутливий об'єм детектора, електрону, який далі вже іонізує робочий газ. Заряджені частинки безпосередньо реєструються робочим газом, пройшовши стінку детектора. Кількість енергії, яку втратить заряджена частинка, проходячи товщину  $\Delta x$ , наближено може бути обрахована за формулою:

$$\Delta E[\text{MeV}] = \left( \frac{dE}{dx} \right) \left[ \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} \right] \cdot \Delta x \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right].$$

#### Задачі.

45. Іонізаційна камера наповнена аргоном. Знайти максимальне число пар іонів, утворених в камері при реєстрації протона з енергією 2,5 кеВ.
46. Електрони з енергією 2 МеВ попадають в циліндричний пропорційний лічильник з тонкою алюмінієвою стінкою. Діаметр та довжина лічильника відповідно дорівнюють 20 мм і 150 мм. Коефіцієнт підсилення лічильника дорівнює 1000, тиск робочого газу 100 мм рт. ст. Оцінити максимальну амплітуду імпульсів на виході лічильника.
47. Оцінити ефективність лічильника Гейгера-Мюллера при реєстрації гама-квантів. Розглянути випадки якщо катод виготовлений нанесенням на скло: а) міді, б) вольфраму.
48. В чутливий об'єм лічильника Гейгера-Мюллера попадає 20 тисяч частинок в секунду. Приймаючи ефективність лічильника за одиницю підрахувати кількість імпульсів, зареєстрованих на виході лічильника. Мертвий час лічильника 120 мкс.
49. Скільки молекул спирту розпадається в лічильнику Гейгера-Мюллера при реєстрації однієї альфа-частинки з енергією 5,1 МеВ?



50. Оцінити довговічність лічильника Гейгера-Мюллера, наповненого парами спирту.

### 5.7.2 Напівпровідникові детектори

У напівпровідникового детектора чутливим об'ємом є напівпровідник. Під дією іонізуючого випромінювання в напівпровіднику утворюються вільні носії заряду. Якщо до напівпровідника, що знаходиться в полі іонізуючого випромінювання, прикласти різницю потенціалів, то за зміною провідності можна зробити висновок про наявність іонізуючого випромінювання.

Напівпровідники характеризуються питомим опором

$$\rho = \frac{RS_0}{l},$$

де  $R$  – опір провідника довжиною  $l$  та поперечним перерізом  $S_0$ .

Якщо з'єднати між собою напівпровідники різного типу провідності, на границі утвориться  $p$ - $n$  перехід зі збідненою областю шириною [11]

$$d[\text{см}] = \sqrt{10^{-9} \cdot \rho[\text{Ом} \cdot \text{см}] \cdot U[\text{В}]},$$

а еквівалентна ємність

$$C \approx 1,1 \frac{S}{d}, \text{ нФ.}$$

Тут  $S$  – площа поверхні переходу,  $U$  – напруга зміщення.

### Задачі.

51. В якому діапазоні енергій можна реєструвати енергетичний спектр альфа-частинок поверхнево-бар'єрним детектором? Робоча напруга на детекторі 30В, питомий опір кремнію 20 кОм см.
52. Поверхнево-бар'єрний детектор на основі кремнію  $n$ -типу опромінюється альфа-частинками з енергією 4,8 МеВ та бета-частинками з максимальною енергією 2,2 МеВ. Оцінити співвідношення амплітуд на виході детектора від альфа- та бета-частинок. Робоча напруга на детекторі 50 В, питомий опір кремнію 20 кОм. см.

53. Знайти максимальне число пар електрон-дирка, утворених в германій-літієвому детекторі при реєстрації гама-квантів з енергією 1,33 MeV.
54. Визначити екстрапольований пробіг електронів у германій-літієвому детекторі об'ємом  $40 \text{ см}^3$  при реєстрації гама-квантів з енергією 2,6 MeV.
55. Оцінити ефективність реєстрації гама-квантів HPGe детектором, чутливий об'єм якого дорівнює  $80 \text{ см}^3$ .
56. Оцінити енергію, що передається гама-квантом радіоактивного джерела  $^{60}\text{Co}$  ядру германія при утворенні пари в германієвому детекторі.

### 5.7.3. Сцинтиляційні детектори

В якості чутливого об'єму у сцинтиляційних детекторах використовуються сцинтиляційні речовини – тобто ті, в яких процес проходження іонізуючого випромінювання супроводжується світловими спалахами (сцинтиляціями). Фотони спалахів вибивають з фотокатода електрони, які, прискорюючись електричним полем, створеним динодами, примножуються.

Величина імпульсу на виході сцинтиляційного детектора  $V$  залежить від кількості первинних фотонів, і, відповідно, від кількості утворених пар під час іонізації. Тому розподіл імпульсів по амплітудах несе інформацію про кількість енергії, залишеній в чутливому об'ємі детектора. Цей розподіл називається функцією відгуку детектора, і за допомогою цієї функції можна визначати енергію випромінювання.

Гамма-квант взаємодіє з сцинтилятором 3-ома типами взаємодії: фотоефект, комптон-ефект, ефект утворення електрон-позитронних пар (при  $E > 1,022 \text{ MeV}$ ). Кожен із цих процесів характеризується перерізом і лінійним коефіцієнтом ослаблення:

$\sigma [\text{см}^2]$  - переріз взаємодії гамма-кванту з атомом;

$\mu [\frac{1}{\text{см}}] = n \cdot \sigma$  - лінійний коефіцієнт ослаблення,  $n$  – концентрація атомів;

$$\tau \left[ \frac{\text{см}^2}{\rho} \right] = \frac{\mu}{\rho} - \text{масовий коефіцієнт ослаблення.}$$

### Задачі.

57. Порівняти переріз фотоефекту на натрії, йоді і талії в сцинтиляторі NaI(Tl). Оцінити відносний вклад цих процесів в пік повного поглинання.
58. Гама-кванти з енергією 0,66 MeV реєструються сцинтиляторами NaI(Tl) і стильбеном. Оцінити, у скільки разів відрізняються між собою площі а) під фотопіками б) під кривими комптонівського розподілу імпульсів. Намалювати функції відгуку.
59. Порівняти поперечні перерізи фотоефекту на вісмуті, германії та кисні в сцинтиляторі  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ . Оцінити відносний вклад кожного з цих перерізів в пік повного поглинання.
60. У скільки разів ефективність детектора на основі германата вісмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO-детектор) відрізняється від ефективності детектора на основі кристалу NaI(Tl) при реєстрації гама-квантів (по фотопіку). Розміри детекторів рівні.
61. Оцінити ефективність реєстрації гама-квантів сцинтилятором NaI(Tl). Розміри сцинтилятора: діаметр 30 мм, висота 40 мм.
62. Оцінити ефективність реєстрації гама-квантів сцинтилятором  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ . Розміри сцинтилятора: діаметр 30 мм, висота 40 мм.
63. Який вигляд матиме функція відгуку сцинтилятора NaI(Tl) при реєстрації гама - квантів з енергією 5 MeV.
64. Який вигляд матиме функція відгуку пластмасового сцинтилятора при реєстрації електронів з енергією 1 MeV та гама-квантів з такою ж енергією.
65. Вибрати детектор і оцінити його оптимальні розміри для калориметра гама-квантів в CMS, що встановлений на колайдері в CERN.
66. Обчислити лінійний та масовий коефіцієнти ослаблення для NaI(Tl) при

реєстрації гама-квантів з енергією 1,33 MeV.

67. При реєстрації детектором NaI(Te) від радіоактивного джерела  $^{60}\text{Co}$  крім комптонівського розподілу спостерігаються чотири піки з енергіями 0,25 MeV, 1,17 MeV, 133 MeV та 2,5 MeV. Пояснити природу цих піків.

**5.7.4. Основні характеристики детекторів випромінювання: енергетична роздільна здатність, ефективність, статистика, дозиметрія [12].**

Амплітуда сигналу на виході детектора, що має внутрішнє газове підсилення (пропорційні детектори, детектори Гейгера-Мюллера) залежить від режиму роботи детектора (робочої напруги на лічильнику) і можуть досягати декількох десятків вольт. У синтіляційних детекторів амплітуда дуже чутлива до величини напруги на фотопомножувачі та її стабільності.

Енергетична роздільна здатність детекторів визначається флуктуаціями числа пар електрон-іон, які проявляються в нестабільності  $\bar{W}$  і описується розподілом Гауса:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2,36 \cdot \sqrt{F}}{\sqrt{\bar{W}}},$$

де  $F$  – фактор Фано, що враховує відхилення флуктуацій від розподілу Гауса:

- $F \approx 0,8$  для газових детекторів;
- $F \approx 0,08$  для напівпровідникових детекторів.

Фактор Фано пов'язує дисперсію  $D$  з середньою кількістю утворених пар  $\bar{N}$ :

$$D = F \cdot \bar{N}.$$

Для характеристики роздільної здатності детектора довірчий інтервал в розподілі Гауса вибирається не стандартним  $\pm\sigma$ , а таким, що на краях вибраного інтервалу  $\pm \frac{\Delta E}{2}$  ймовірність (густина ймовірності) дорівнює половині максимального значення розподілу Гауса. Міжнародне значення

енергетичної роздільної здатності “FWHM” – повна ширина  $\Delta E$  енергетичного розподілу на половині висоти.

Ефективність реєстрації детектора  $\varepsilon$  визначається як відношення кількості частинок, що зареєструвалися  $N_{зар}$  до кількості частинок, що попали в чутливий об’єм детектора  $N_{non}$ :

$$\varepsilon = \frac{N_{зар}}{N_{non}}.$$

Ефективність реєстрації заряджених частинок будь-якого детектора близька до 100% за умови попадання частинки в чутливий об’єм детектора. При реєстрації гама-квантів ефективність визначається за формулою:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu x}$$

де  $x$  – характерні лінійні розміри чутливого об’єму детектора,  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення чутливого об’єму детектора.

### Задачі.

68. Детектором ядерного випромінювання зареєстровано 432 імпульси за 5 хв. 1) Визначити статистичну похибку отриманого результату. 2) Записати інтенсивність в імп/с, вказавши абсолютну та відносну похибки.
69. Активність радіоактивного зразка вимірювалась 5 раз по 3 хв. детектором з ефективністю (світлосилою) реєстрації 10%. Середнє число зареєстрованих імпульсів дорівнює 358,6. Фон за цей же час дорівнює 213,2 імпульсів. Визначити активність зразка, вказавши його абсолютну та відносну похибки.
70. Детектором зареєстровано 412 імпульсів за 5 хв. Кількість фонових імпульсів за цей же час складає 330 імпульсів. Записати інтенсивність в імп/с, вказавши абсолютну та відносну похибки.
71. Випромінювання радіоактивного точкового джерела реєструється торцевим лічильником Гейгера-Мюлера з діаметром вхідного вікна 20

мм і який знаходиться на віддалі 10 см від джерела. Реєстрація випромінювання кожного зразка ведеться 5 хв. Фон за цей час - 330 імпульсів. Оцінити активність зразка, яку можна виміряти із статистичною похибкою 2%. Вважати, що ефективність лічильника близька до 100%.

72. Інтенсивність випромінювання дорівнює фону. У скільки разів довше потрібно вести вимірювання для збереження статистичної точності при наявності фону.
73. У скільки разів відрізняється енергетична роздільна здатність детектора при реєстрації гама-квантів з енергіями 1,17 MeV та 0,66 MeV?
74. Показати, що спектрометр гама - квантів на основі германієвого детектора має значно вищу енергетичну роздільну здатність в порівнянні з іншими відомими спектрометрами.
75. Знайти зв'язок енергетичної роздільної здатності з величиною стандартної похибки у випадку гаусовського розподілу амплітуд зареєстрованих імпульсів.
76. Поглинута доза є енергетичним еквівалентом експозиційної дози. Вказати одиниці вимірювання, розмірності цих величин та розрахувати коефіцієнт, що зв'язує експозиційні дози в системах СГС та СІ.
77. Поглинута доза є енергетичним еквівалентом експозиційної дози. Вказати одиниці вимірювання, розмірності цих величин та розрахувати коефіцієнт, що зв'язує експозиційну дозу (визначену у Рентгенах) з поглинутою дозою для повітря (визначеною у Греях). Густина повітря дорівнює  $1,293 \text{ мг/см}^3$ .
78. Еквівалентна доза є мірою несприятливих наслідків при опроміненні живого організму, живої тканини чи органу. Вказати одиницю вимірювання та розмірність еквівалентної дози, її зв'язок з поглинутою дозою для різних видів випромінювання. Розрахувати еквівалентну дозу,

яку отримав живий організм при опроміненні експозиційною дозою 1 Рентген.

79. Активність точкового закритого радіоактивного джерела дорівнює  $3,7 \times 10^7$  Бк. На якій відстані потужність експозиційної дози в 5 разів перевищить рівень природного фону.
80. На відстані 1 м потужність експозиційної дози від точкового радіоактивного препарату в 5 разів перевищує рівень природного фону. На якій відстані дозиметр покаже граничну допустиму дозу для спеціалістів категорії А (експозиційну, поглинуту та еквівалентну)?

## Залежність питомих іонізаційних втрат від енергії [11]

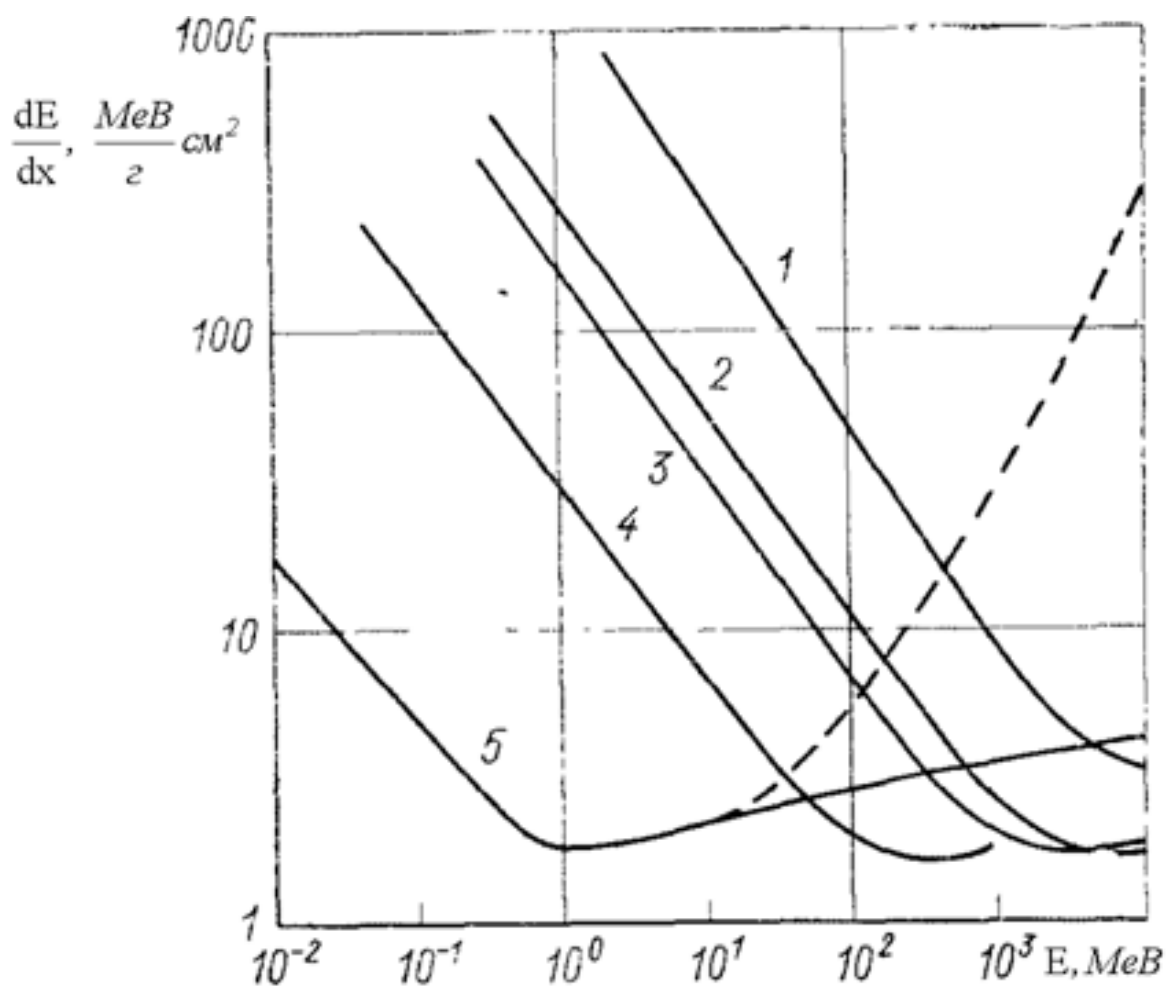


Рис1. Залежність питомих іонізаційних втрат від кінетичної енергії  $\alpha$ -частинок (1), дейтронів (2), протонів (3), мюонів (4) та електронів (5) в повітрі за нормальних умов. Пунктир – з врахуванням питомих втрат на гальмівне випромінювання.



## Одиниці фізичних величин [13]

## Позначення та назви деяких одиниць

А – ампер	Гц – герц	Мкс – максвелл
Å – ангстрем	дин – дина	Н – ньютон
а.е.м. – атомна одиниця маси	Дж – джоуль	хв – хвилина
Б – бел	дптр – діоптрія	Па – паскаль
б – барн	К – кельвін	рад – радіан
Бк – беккерель	кал – калорія	с – секунда
В – вольт	кд – кандела	Ср – стерadian
Вб – вебер	Кл – кулон	Тл – тесла
Вт – ват	л – літр	Ф – фарад
Гн – генрі	лк – люкс	год – година
г – грам	лм – люмен	Е – ерстед
Гс – гаус	м – метр	еВ – електрон-вольт

## Десяткові приставки до назв одиниць

Е – екса $10^{18}$	к – кіло $10^3$	мк – мікро $10^{-6}$
П – пета $10^{15}$	г – гекто $10^2$	н – нано $10^{-9}$
Т – тера $10^{12}$	д – деци $10^{-1}$	п – піко $10^{-12}$
Г – гіга $10^9$	с – санти $10^{-2}$	ф – фемто $10^{-15}$
М – мега $10^6$	м – мілі $10^{-3}$	а – атто $10^{-18}$

## Одиниці величин в СІ та СГС

Величина	Одиниця величини		Відношення $\frac{\text{од.СІ}}{\text{од.СГС}}$
	СІ	СГС	
Довжина	м	см	$10^2$
Час	с	с	1
Швидкість	м/с	см/с	$10^2$
Прискорення	м/с <sup>2</sup>	см/с <sup>2</sup>	$10^2$
Частота коливань	Гц	Гц	1
Кругова частота	с <sup>-1</sup>	с <sup>-1</sup>	1
Кутова швидкість	рад/с	рад/с	1
Кутове прискорення	рад/с <sup>2</sup>	рад/с <sup>2</sup>	1
Маса	кг	г	$10^3$
Густина	кг/м <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	$10^{-3}$
Сила	Н	дин	$10^5$
Тиск	Па	дин/см <sup>2</sup>	10
Імпульс	кг·м/с	г·см/с	$10^5$
Момент сили	Н·м	дин·см	$10^7$
Енергія, робота	Дж	ерг	$10^7$
Потужність	Вт	ерг/с	$10^7$

Густина потоку енергії	Вт/м <sup>2</sup>	ерг/(с·см <sup>2</sup> )	10 <sup>3</sup>
Момент імпульсу	кг·м <sup>2</sup> /с	г·см <sup>2</sup> /с	10 <sup>7</sup>
Момент інерції	кг·м <sup>2</sup>	г·см <sup>2</sup>	10 <sup>7</sup>
В'язкість	Па·с	П	10
Температура	К	К	1
Теплоємність, ентропія	Дж/К	ерг/К	10 <sup>7</sup>
Кількість електрики	Кл	СГСЕ-од.	3·10 <sup>9</sup>
Потенціал	В	СГСЕ-од.	1/300
Напруженість електричного поля	В/м	СГСЕ-од.	1/(3·10 <sup>4</sup> )
Електричне зміщення	Кл/м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	12π·10 <sup>5</sup>
Електричний момент диполя	Кл·м	СГСЕ-од.	3·10 <sup>11</sup>
Поляризованість	Кл/м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	3·10 <sup>5</sup>
Ємність	Ф	см	9·10 <sup>11</sup>
Сила струму	А	СГСЕ-од.	3·10 <sup>9</sup>
Густина струму	А/м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	3·10 <sup>5</sup>
Опір	Ом	СГСЕ-од.	1/(9·10 <sup>11</sup> )
Питомий опір	Ом·м	СГСЕ-од.	1/(9·10 <sup>9</sup> )
Провідність	См	СГСЕ-од.	9·10 <sup>11</sup>
Магнітна індукція	Тл	Гс	10 <sup>4</sup>
Магнітний потік	Вб	Мкс	10 <sup>8</sup>
Напруженість магнітного поля	А/м	Е	4π·10 <sup>-3</sup>
Магнітний момент	А·м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	10 <sup>3</sup>
Намагніченість	А/м	СГСЕ-од.	10 <sup>-3</sup>
Індуктивність	Гн	см	10 <sup>9</sup>
Сила світла	кд	кд	1
Світловий потік	лм	лм	1
Світимість	лм/м <sup>2</sup>		
Яскравість	кд/м <sup>2</sup>		

*Примітка.* Електричні та магнітні одиниці в СГС тут дані в гаусовій системі.

#### Деякі позасистемні одиниці

1 рік = 3,156·10 <sup>7</sup> с	1 Å = 10 <sup>-8</sup> см
1 атм = $\begin{cases} 101,3 \text{ кПа} \\ 760 \text{ мм.рт.ст.} \end{cases}$	1 б = 10 <sup>-24</sup> см
1 бар = 100 кПа (точно)	1 еВ = $\begin{cases} 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ерг} \end{cases}$
1 мм.рт.ст. = 133,3 Па	1 а.е.м. = $\begin{cases} 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 931,5 \text{ МеВ} \end{cases}$
1 л·атм = 101,3 Дж	
1 кал = 4,18 Дж	1 Кі (кюри) = 3,70·10 <sup>10</sup> Бк

## Основні фізичні константи [14]

Швидкість світла в вакуумі	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м / с}$
Гравітаційна стала	$\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot \text{с}^2$
Стандартне прискорення вільного падіння	$g = 9,807 \text{ м / с}^2$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стандартний об'єм моля газу	$V_0 = 22,41 \text{ л / моль}$
Молярна газова стала	$R = 8,314 \text{ Дж / (К} \cdot \text{моль)}$
Стала Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К}$
Стала Фарадея	$F = 0,965 \cdot 10^5 \text{ Кл / моль}$
Елементарний заряд	$e = \begin{cases} 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} \end{cases}$
Маса електрона	$m_e = \begin{cases} 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \\ 0,511 \text{ MeV} \end{cases}$
Питомий заряд електрона	$e / m_e = \begin{cases} 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл / кг} \\ 5,27 \cdot 10^{17} \text{ CGSE / э} \end{cases}$
Маса протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Питомий заряд протона	$e / m_p = \begin{cases} 0,959 \cdot 10^8 \text{ Кл / кг} \\ 2,87 \cdot 10^{14} \text{ CGSE / э} \end{cases}$
Стала Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = \begin{cases} 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ 0,659 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{с} \end{cases}$
Стала Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4)$

Стала закону зміщення Віна	$b = 0,29 \text{ см} \cdot \text{K}$
Стала Рідберга	$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$ $R' = R / 2\pi c = 1,097 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Перший борівський радіус	$E = 13,56 \text{ eV}$
Енергія зв'язку електрона в атомі водню	$\lambda_C = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\tilde{\lambda}_C = \lambda_C / 2\pi = 3,86 \cdot 10^{-13} \text{ м}$
Класичний радіус електрона	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = \begin{cases} 0,9274 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{Тл} \\ 0,9274 \cdot 10^{-20} \text{ ерг} / \text{Гс} \end{cases}$
Ядерний магнетон	$\mu_N = \begin{cases} 5,051 \cdot 10^{-27} \text{ Дж} / \text{Тл} \\ 5,051 \cdot 10^{-24} \text{ ерг} / \text{Гс} \end{cases}$
Магнітний момент протона	$\mu_p = 2,7928 \mu_N$
Магнітний момент нейтрона	$\mu_n = -1,913 \mu_N$
Атомна одиниця маси	$1 \text{ а.е.м.} = \begin{cases} 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ 931,5 \text{ MeV} \end{cases}$
Електрична стала	$\varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} / \text{м}$ $1 / 4\pi\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ м} / \text{Ф}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{м}$ $\mu_0 / 4\pi = 10^{-7} \text{ Гн} / \text{м}$

## Використана література

1. Атомна та квантова фізика / Програма навчальної дисципліни, розробник Лещенко Б.Ю., 2020 – 9с. режим доступу <https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&show&irid=194632> .
2. Атомна та квантова фізика / Робоча навчальна програма кредитного модулю, розробник Лещенко Б.Ю., 2020 – 13с. режим доступу <https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&show&irid=194635> .
3. Иванов В. И., Машкович В. И. Центер Э. М. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. – М.: Энергоиздат, 1981 – 200с.
4. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976 – 1008 с.
5. Ядерна та нейтронна фізика: практикум для студентів спеціальності 143 «Атомна енергетика», спеціалізації «Атомні електричні станції» / Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 24 с. Режим доступу <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22882>.
6. Парогенератори та теплообмінники АЕС: Методичні вказівки до практичних занять для студентів напрямів підготовки 6.050603 “Атомна енергетика” та 6.050604 “Енергомашинобудування” / Уклад.: Є.В. Шевель. – К.: НТУУ «КПІ», ТЕФ, каф. АЕС і ІТФ, 2013. – 72с.
7. Мухин К.Н., Экспериментальная ядерная физика. т.2: Физика элементарных частиц. Учебник для вузов / К.Н. Мухин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 408 с.
8. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика, т.1: Физика атомного ядра. Учебник для вузов / К.Н. Мухин. – М.: Энергоатомиздат, 1974. – 584 с.
9. Широков Ю.М. Ядерная физика. Учебник для вузов / Ю.М. Широков, Юдин, Н.П. – М.: Наука, 1980. – 729 с.
10. Немец О.Ф. Справочник по ядерной физике / О.Ф.Немец, Ю.В.Гофман. – Киев: Наукова думка, 1975. – 415 с.

11. Абрамов А.И. Основы экспериментальных методов ядерной физики. Учебное пособие для вузов / А.И. Абрамов, Ю.А.Казанский, Е.С.Матусевич. – М.: Атомиздат, 1977. – 525 с.
12. А.В. Носовський Дозиметрія та захист від іонізуючого випромінювання: підручник / А.В. Носовський, Б.М. Бондар – Київ: Фенікс, 2020. – 408с.
13. Иродов И. Е. Задачи по общей физике: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1988. – 416 с.
14. Richard B. Firestone Table of Isotopes / CD-ROM Edition version 1, March 1996. Режим доступу <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/abouttoi.htm>.